

## PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE ZWISCHEN DEN BODENTEILCHEN WIRKENDEN KRÄFTE

Von Albrecht Gerlach

Die Arbeit eines Landmaschinenkonstruktors wird von bodenphysikalischen Gesetzen und Erscheinungen in vielfacher Weise beeinflusst. Z.B. spielt bei Pflugversuchen oder bei Untersuchungen über die Zugfähigkeit von Schlepperreifen die Festigkeit des Bodens eine grosse Rolle. Wegen der Wichtigkeit der Probleme des Bodenzusammenhaltes erscheint es gerechtfertigt, sich einmal mit den dabei wirksamen Elementarvorgängen zu befassen und die Frage aufzuwerfen, welche Kräfte letzten Endes die einzelnen Bodenteilchen zusammenhalten.

Gehen wir von dem einfachen Fall zweier sich berührender Sandkörnchen, zweier Quarzkristalle, aus. Die Berührungsstelle ist Sitz einer gegenseitigen Anziehungskraft, der sogenannten Kohäsion. Bei Sandkörnchen mit Durchmessern von Millimetern merken wir allerdings von dieser Kraft nicht viel, weil sie in diesem Fall klein ist im Verhältnis zur Masse. Diese Kraft erreicht aber schon die Grössenordnung der allgemeinen Schwerkraft, wenn wir es mit Staubteilchen zu tun haben, denn diese haften aneinander und an anderen Körpern.

Wie haben wir uns das Zustandekommen dieser Kräfte zu denken? Alle Moleküle fester Körper üben starke Anziehungskräfte aufeinander aus, die eben seine „Festigkeit“ bedingen. Im Innern des Körpers gleichen sich diese Kräfte aus, da sie auf jedes einzelne Molekül im Mittel von allen Seiten gleich stark einwirken (Bild 1). In der Oberfläche dagegen ist diese Symmetrie gestört. Die in ihr sitzenden Moleküle erleiden einen Zug nach innen und sind selbst in der Lage, Anziehungskräfte auszuüben auf Moleküle und Körper ausserhalb.

Wollte man nur diese reine Kohäsionskraft zwischen zwei mineralischen Bodenteilchen studieren, so hätte das im Vakuum zu geschehen. Denn sobald die Teilchen von Luft umgeben sind, wirken sich die oben beschriebenen Oberflächenkräfte auf die umgebenden Gasmoleküle aus und adsorbieren diese, bis das Teilchen mit einer stark verdichteten Lufthülle umgeben ist.

In mit Wasserdampf gesättigter Atmosphäre adsorbieren Bodenteilchen bevorzugt Wassermoleküle und zwar solange, bis sich ein Gleichgewicht einstellt zwischen der Adhäsionskraft und dem Dampfdruck des angelagerten Wassers. Da der Dampfdruck bei gekrümmten Oberflächen mit abnehmendem Krümmungsradius wächst, sind grössere Teilchen von dickeren Wasserhüllen umgeben als kleinere. Teilchen von

1 mm Durchmesser tragen etwa 1000 Molekülschichten Wasser. Das ist eine Schichtdicke von etwa  $0,2 \mu$ . Bei Teilchen von  $10 \mu$  Grösse werden nur etwa 15 Molekülschichten adhärirt [1]. In Analogie zu einem chemischen Vorgang bezeichnet man dieses durch Adhäsionskräfte gebundene Wasser in der Bodenkunde als „hygroskopisches Wasser“. Wegen seiner starken Bindung an die Bodenteilchen ist es für die Pflanzenernährung nicht nutzbar. Es steht unter einem mittleren Druck von etwa 50 at [2]. Dieser Druck ist wesentlich grösser als der für die Wasseraufnahme durch die Wurzeln massgebende osmotische Druck. In einem sandigen Lehmboden z.B. macht dieses hygroskopische Wasser etwa 2 Gewichts-% aus. Welkungserscheinungen stellen sich aber bereits bei dem 3-fachen Feuchtigkeitsgehalt ein [3].

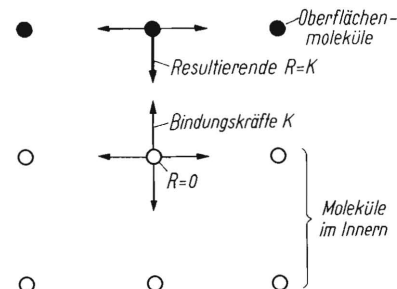


Bild 1. Das Zustandekommen von Oberflächenkräften. Die im Innern eines Körpers vorhandene Symmetrie der Bindungskräfte ist an der Oberfläche gestört.

Das für die Vegetation nutzbare Bodenwasser ist kapillar gebunden. Diese Bindung beruht auf Oberflächenkräften analog denen, die bei den festen Mineralteilchen beschrieben wurden. Mit dem Unterschied, dass die Moleküle einer Flüssigkeit leicht gegeneinander verschiebbar sind. Unter der Einwirkung der ins Innere gerichteten Zugkräfte auf die Oberflächenmoleküle treten in der Flüssigkeitsoberfläche Spannungen auf, die einerseits die Bodenteilchen zusammenhalten, andererseits grössere Wassermengen an den Boden zu binden vermögen. Die Erscheinung, dass Wasser in Kapillaren um so höher aufsteigt, je enger deren Durchmesser ist, ist allgemein bekannt. Auch die kapillare Steighöhe zwischen zwei parallelen Ebenen ist ihrem Abstand umgekehrt proportional. Dieser Zusammenhang lässt sich durch ein einfaches Experiment (Bild 2) zeigen.

Voraussetzung für diese Erscheinung ist allerdings, dass die Platten bzw. Kapillaren benetzt werden. Sonst stellt sich der umgekehrte Vorgang ein,

die sog. Kapillardepression, wie z.B. beim Quecksilber. Auch Böden können unter besonderen Umständen unbenetzbar werden. Im allgemeinen sind die Bodenteilchen aber durch das hygroskopische Wasser benetzt.

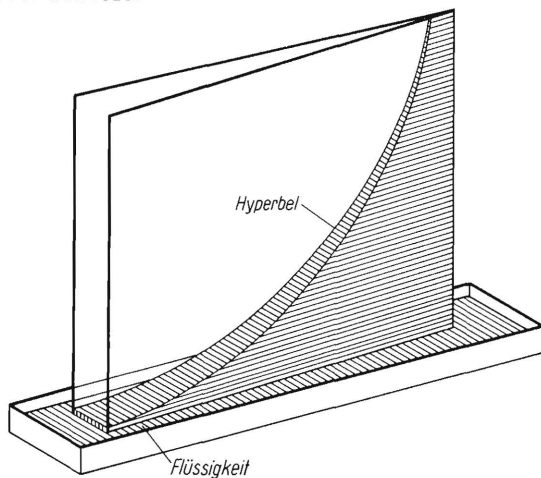


Bild 2. Versuch zur Demonstration von Kapillarkräften. Zwischen zwei Glasplatten, die einen kleinen Flächenwinkel miteinander bilden, steigt eine Flüssigkeit umso höher empor, je geringer der Plattenabstand ist.

Befindet sich ein Wassertropfen zwischen zwei Teilchen, die der Einfachheit halber als kugelförmig angenommen werden sollen, so wird es sich unter dem Einfluss der Oberflächenspannung als ringförmige Wulst um die Kontaktstelle lagern (Bild 3). Durch die starke Krümmung des begrenzenden Meniskus stellt sich Unterdruck im Kapillarwasser ein. Die Kugeln werden aneinander gezogen. *Allberry* hat 1950 in einem Bild 3 entsprechenden Modellversuch die auftretende Anziehungskraft gemessen [4]. Er fand sie proportional dem Durchmesser der Kugeln und umgekehrt proportional dem Taillendurchmesser des Tropfens.

Beim Auseinanderziehen der Kugeln nimmt der Widerstand mit grösser werdendem Abstand ab, so dass Wassermenisken in dieser Form keinen Beitrag zur Elastizität des Bodens zu geben vermögen, denn die Kraft, die nötig ist, um den Kontakt der festen Teilchen aufzuheben, vermag auch den Tropfen zu zerreißen. Die zur Trennung erforderliche Arbeit wächst mit dem Taillendurchmesser des Tropfens. *Allberry's* Messungen zeigen eine hervorragende Übereinstimmung mit den vorausberechneten Werten. Er warnt aber selbst vor einer Verallgemeinerung seiner Ergebnisse auf das Verhalten natürlicher Böden, in denen neben sich berührenden Kugelflächen noch eine Vielzahl anderer Formen des Kontaktes denkbar sind. Für den Fall eines Kreiskegels, der mit seiner Spitze eine Ebene senkrecht berührt, lässt sich zeigen, dass die Adhäsionskraft den linearen Abmessungen des Tropfens nicht umgekehrt proportional ist wie bei Kugeln, sondern direkt proportional, mit grösser werdendem Wassergehalt also wächst.

Wie in einem natürlichen Boden und zwar in einem feinsandigen Lehm<sup>1)</sup> die Festigkeit vom Wassergehalt abhängt, zeigt Bild 4. Die Kurve wurde durch Biegeversuche an Bodenriegeln ermittelt. Feingesiebter getrockneter Boden wurde durch Besprühen mit einem Zerstäuber gleichmässig bis zum gewünschten Mass angefeuchtet und dann in einer Bodenpresse zu Riegeln von etwa  $15 \times 5 \times 2,5$  cm Grösse geformt. Diese Riegel wurden so auf den Rand eines Tisches gelegt, dass sie ca. 4 cm über ihn hinausragten. Um ein Kippen zu verhindern, wurde das aufliegende Ende mit einem Gewicht beschwert. Die Belastung erfolgte durch Einleiten von Wasser in einen an das überstehende Riegelende angehängten Topf und zwar so lange, bis der Bruch eintrat. Aus dieser Belastung und dem Gewicht des überstehenden Riegelendes wurde das Biegemoment für den gefährdeten Querschnitt errechnet. Durch Vorversuche mit verschiedenen Querschnitten wurde ermittelt, dass die Biegefestigkeit von Bodenriegeln den gleichen Gesetzen genügt, wie sie sich bei der Prüfung metallischer Werkstoffe ergeben. Es liess sich also die maximale Zugspannung (Biegefestigkeit  $\sigma_b = M_b/W$ ) aus dem Biegemoment beim Bruch und den Abmessungen der Probekörper errechnen. Es wurde die Feuchtigkeit bei konstant gehaltenem Porenanteil variiert. Im Ursprung der

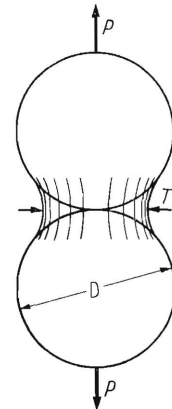


Bild 3. Zwei kugelförmige Teilchen durch einen Flüssigkeitstropfen verbunden. Versuchsanordnung *Allberry's* zur Messung von Oberflächenwirkungen.  $P$  = aufgebrachte Kraft.

Kurve wurde bei vollkommen trockenem Boden mit der Bruchfestigkeit die reine Kohäsion der Teilchen gemessen. Mit zunehmender Feuchtigkeit wächst dann die Festigkeit stark an, so lange, bis sich um jede Berührungsstelle zweier Teilchen ein Wasser ring gebildet hat. Sie sinkt dann wieder ab, wenn sich die ersten Mikroporen mit Wasser gefüllt haben und damit die Zahl der verbindenden Ringe abnimmt. Dieser Festigkeitsabfall verlangsamt sich, weil jetzt die zu füllenden Poren grösser werden. Das heisst, es ist eine grössere Menge zusätzlichen Wassers nötig, um die Zahl der Oberflächenbrücken weiter zu ver-

1) Mech. Bodenanalyse: 12% Grobsand, 54% Feinsand, 26% Schluff und 8% Ton.

ringern. Und auf die Zahl dieser Menisken kommt es ja in erster Linie an.

Bei 22% Feuchtigkeit mussten die Versuche abgebrochen werden. Ziegel mit noch grösserer Feuchtigkeit liessen sich bei dem gegebenen Porenanteil nicht herstellen, weil beim Pressen der angefeuchteten Bodenmasse Wasser austrat. Bei einer Feuchtigkeit von 22% sind zwar nur etwa zwei Drittel des Porenvolumens von Wasser erfüllt, es fehlen aber durchgehende Poren, durch die die Luft beim Pressen der Probekörper entweichen könnte.

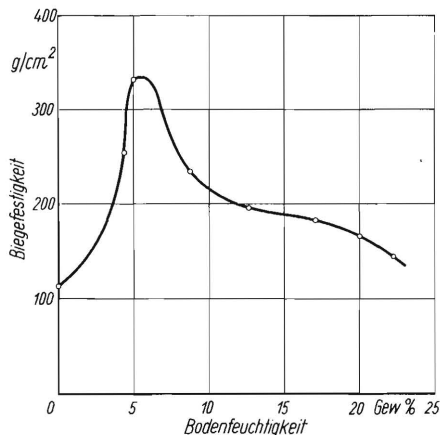


Bild 4. Biegefestigkeit von Bodenziegeln aus sandigem Lehm in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit. Der Porenanteil betrug einheitlich 45%. Die Feuchtigkeit ist in Gew. % der trockenen Probe eingetragen.

Der Verlauf einer solchen Festigkeitskurve, wie sie Bild 4 zeigt, ist natürlich für jede Bodenart ein anderer. Bei normalen Böden haben wir es mit Gemischen von Teilchen zu tun, deren Grösse über 5 Zehnerpotenzen schwankt, von Steinen mit 10 cm Durchmesser angefangen bis zu Tonteilchen von einigen  $\mu$ . Der Einfluss der Korngrössenzusammensetzung, der Textur des Bodens, auf die Bruchspannung hat Puchner [5] in zahlreichen Druckversuchen mit Bodenproben ermittelt. Er erzielte die folgenden Ergebnisse:

Trennt man die einzelnen Korngrössenfraktionen von Böden und trägt die Bruchlast der daraus hergestellten Probekörper über der Feuchtigkeit auf, so ergeben sich Kurven ähnlich der vorhin gezeigten (Bild 5). Und zwar ist die Druckfestigkeit erstens umso grösser und zweitens umso mehr nach kleinen Feuchtigkeitwerten hin verschoben, je feinkörniger die Fraktion ist.

Im natürlich gelagerten Boden liegen diese zunächst einmal einzeln untersuchten Fraktionen in sehr verschiedenen Mischungen vor. Bei der Untersuchung solcher Gemische stellte Puchner fest, dass für die Grösse der Druckfestigkeit nicht allein der Anteil an feindispersen Material massgebend ist, das ja, wie wir eben sahen, die grösste Druckfestigkeit besitzt, sondern auch die prozentuale Verteilung der gesamten Bodenmasse auf die einzelnen Fraktionen. Ich möchte das einmal in Analogie zur

Optik Dispersionsspektrum nennen. Die Festigkeit ist dann besonders niedrig, wenn in diesem Spektrum Lücken vorhanden sind. Auf der anderen Seite können aber Mischungen bedeutend grössere Festigkeiten aufweisen als die festeste ihrer Komponenten. Wir haben uns die Zusammensetzung eines sehr festen Bodens also so vorzustellen, dass die nächst kleinere Fraktion jeweils die Zwischenräume zwischen der grösseren nahezu ausfüllt usw., so dass ein möglichst dichtes Netz von Brücken zwischen allen Bodenteilchen entsteht.

Aber auch Böden gleicher Textur und gleicher Feuchtigkeit können verschiedene Festigkeit besitzen. Auch die geometrische Anordnung der Einzelteilchen zueinander, die sog. Struktur, übt einen wesentlichen Einfluss auf den Bodenzusammenhalt aus.

Besonders deutlich wird das durch folgenden Versuch:

Wir haben aus dem gleichen Boden, an dem die oben erwähnten Biegeversuche durchgeführt wurden, Ziegel von 7% Feuchtigkeit auf drei verschiedene Weisen hergestellt und deren Festigkeit bestimmt:

1. wurde Boden von 7% Feuchtigkeit gepresst und sofort gebrochen,
2. wurden Ziegel von 14% Feuchtigkeit hergestellt, bis zu 7% getrocknet und dann untersucht,
3. wurden Ziegel, die bei 7% hergestellt worden waren, durch Beregnung auf 14% angefeuchtet und dann wieder auf 7% getrocknet.

Im Fall 1 erhielten wir 250 g/cm<sup>2</sup> Biegefestigkeit  
 „ „ 2 „ „ 1000 „ „ „  
 „ „ 3 „ „ 500 „ „ „

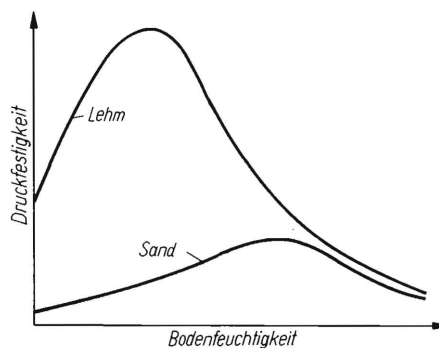


Bild 5. Druckfestigkeit von Proben verschiedener Böden (nach Puchner [5]).

Wie wir uns die Verfestigung der Ziegel durch Nach-trocknen vorzustellen haben, zeigt Bild 6. Die beiden sich berührenden Kreisbögen sollen die Kontaktstellen zweier grösserer Bodenteilchen darstellen, etwa zweier Sandkörnchen. In Bild 6a umgibt diese Kontaktstelle ein verhältnismässig umfangreicher Wasserring. In ihm befinden sich kleinere Teilchen, teils schwimmend, teils an die Sandkörnchen angelagert, aber ganz von Wasser umgeben, so dass sie nicht zum Zusammenhalt der Körnchen beitragen.

Beim Austrocknen geht die Oberfläche des Wasser-ringes zurück, wie das durch die gestrichelte Linie angedeutet ist. Dabei schlämmt sie die kleineren Teilchen zur Kontaktstelle hin. Es bilden sich neue Brücken, wie das in Bild 6b dargestellt ist. Die beiden Sandkörnchen sind durch wesentlich höhere Kräfte aneinander gebunden als in Bild 6a. In Bild 6c schliesslich ist der Gesamtwassergehalt der gleiche wie in Bild 6b. Die kleineren Teilchen sind aber an beliebigen Stellen an die grösseren angelagert und erhöhen die Bindungskraft nicht. Dafür, dass wir die ausserordentlich grosse Verfestigung von Fall 2 im Fall 3 nicht gefunden haben, sind zwei Ursachen denkbar:

1. Durch das Beregnen entstehen in der Oberfläche kleine Inhomogenitäten, die natürlich die Bruchfestigkeit herabsetzen, da in der Oberfläche des Ziegels gerade die beim Bruchversuch durch Biegebeanspruchung am stärksten belastete Zone liegt.
2. Beim feucht hergestellten und dann nachgetrockneten Ziegel wird wegen der geringeren inneren Reibung schon durch die Verdichtung beim Pressen eine festere Struktur erreicht, als das beim trockener hergestellten Ziegel durch nachträgliches Anfeuchten erzielt werden kann.

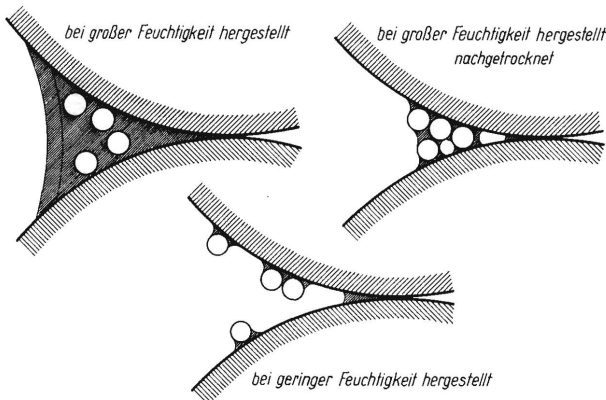


Bild 6. Verfestigung von Bodenziegeln.

Ausser Textur und Struktur übt auch noch die geometrische Gestalt der Bodenteilchen einen Einfluss auf die Bindigkeit aus. Bisher hatten wir unseren Betrachtungen meist kugelförmige Teilchen zugrundegelegt. Besonders die feinste Fraktion des Bodens weist aber einen grossen Formenreichtum auf. Vergrössert man die Feuchtigkeit eines Bodens, so gibt es bei den meisten Böden ein Feuchtigkeitsintervall, in dem sie plastisch formbar sind. Bei weiterem Anfeuchten zerfliessen sie schliesslich. Atterberg [6] hat festgestellt, dass Böden dann eine besonders grosse Elastizität besitzen, wenn ihre feinsten Teilchen, also die der Tonfraktion, blättchenförmig sind. Nichols [7], der mit synthetischen Böden, künstlichen Mischungen aus Sand und Ton, experimentierte, stellte fest, dass die kritische Feuchtigkeit, bei der

Böden plastisch werden, vom Logarithmus des Kolloidgehaltes, d.h. des Gehaltes an jenen feinsten, blättchenförmigen Teilchen abhängt.

Bei der Besprechung der Dispersität (Zerteilungsgrad) sei noch daran erinnert, dass durch den feindispersen Anteil die Gesamtoberfläche des Bodens bedeutend vergrössert wird, obwohl dieser Anteil nur wenige Gewichtsprozent des Bodens ausmacht.

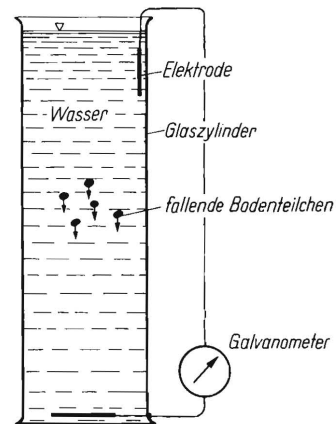


Bild 7. Versuchsanordnung zum Nachweis der Ladung auf Bodenteilchen.

Die zu Boden sinkenden Ladungsträger verursachen einen Strom durch das Galvanometer.

Der zu unseren Festigkeitsversuchen benutzte sandige Lehm z.B. hat eine spezifische Oberfläche von ca.  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ . Als ungefähres Mass dieser Oberfläche kann die bei der Anlagerung des hygroskopischen Wassers frei werdende Benetzungswärme dienen. Sie beträgt in unserem Fall ca.  $2,5 \text{ cal/g}$ . D.h. wenn man Verluste durch Leitung und Strahlung vermeiden könnte, würde sich der vorher vollkommen trockene Boden bei Benetzung um ca.  $6^\circ$  erwärmen. Durch diesen Effekt kann die Festigkeit des Bodens insofern verändert werden, als in Krümel eingeschlossene Luftblasen in der Lage sind, bei der Ausdehnung durch die Benetzungswärme die Krümel zu sprengen.

Ein anderer Einflussfaktor auf die Kräfte zwischen den Bodenteilchen ist die elektrische Ladung, die diese auf ihrer Oberfläche tragen. Sie hat verschiedene Ursachen: Erstens ist auf der Oberfläche von festen Körpern nicht nur, wie vorhin erwähnt, die Symmetrie der Kräfte gestört, sondern auch die der elektrischen Ladungen. Zweitens werden auf der Oberfläche selektiv Ionen adsorbiert. Dass alle mineralischen Bodenteilchen, die von Wasser umgeben sind, auf ihrer Oberfläche negative Ladungen tragen, lässt sich durch ein einfaches Experiment zeigen (Bild 7). Schüttet man Bodenteilchen in ein senkrecht stehendes Glasrohr, das an jedem Ende eine Elektrode enthält, so zeigt ein angeschlossenes Galvanometer einen Strom an, wenn diese Teilchen unter der Wirkung der Schwerkraft zu Boden sinken. Aus der Polarität des Stromes kann man das Vorzeichen der Ladung ermitteln.

Die Ladungen in der Oberfläche der Teilchen induzieren in dem sie umgebenden Wasser Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens, so wie das bei jedem Kondensator der Fall ist. Auch diese im Wasser sitzenden Gegenladungen lassen sich in einem einfachen Experiment zeigen (Bild 8). Legt man an eine Probe feuchten Bodens mittels zweier Elektroden eine Spannung an, so wird die im Wasser sitzende Gegenladung unter der Wirkung des elektrischen Feldes bewegt. Das heisst, es wird Wasser an der Kathode ausgeschieden. Dieser Elektrosmose genannten Erscheinung überlagert sich ein Strom durch die Ionenleitung in der Bodenlösung, der aber keinen Wassertransport verursacht, sondern nur galvanische Wirkungen und Stromwärme.

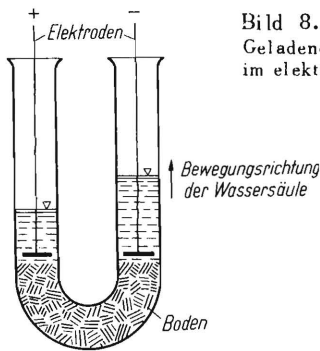


Bild 8. Elektrosmose am Boden. Geladene Wasserteilchen bewegen sich im elektrischen Feld zwischen den beiden Elektroden.

Die eben gezeigte Erscheinung hat bereits mehrfache technische Anwendung gefunden. Sie ist zur Drainage von Baugründen verwendet worden. Ausserdem kann man z.B. beim Einrammen von eisernen Spundwänden in den Boden durch Anlegen einer Spannung an die Spundwand Wasser abscheiden, das die Reibung beträchtlich herabsetzt und somit Energie spart. Weber [8] hat diese Erscheinung unter landtechnischen Gesichtspunkten untersucht. Er bestimmte die Abnahme der Reibungszahl beim Ziehen eines Stahlschlittens auf Boden, wieder unter gleichzeitiger Anwendung von Strom. Bild 9 zeigt, dass sich bei geringer Geschwindigkeit des Schlittens eine beträchtliche Reibungsverminderung erzielen lässt, wenn nämlich genügend Zeit zur Ausbildung eines Schmierfilmes vorhanden ist. Mit wachsender Ge-

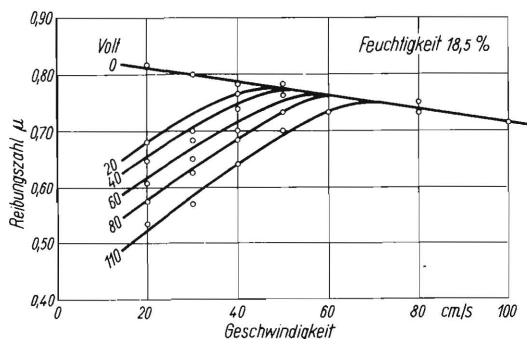


Bild 9. Verminderung der Reibung zwischen Stahl und Boden durch Elektrosmose (nach Weber [8]).

Die Voltzahlen geben die Spannungen an, die zwischen dem reibenden Schlitten und einer Gegenelektrode im Boden angelegt wurden.

windigkeit wird die Reibungsverminderung schliesslich Null. Weber stellte auch noch Pflugversuche an, bei denen zwischen Sech und Schar eine Spannung angelegt war. Die dabei erzielte Zugkraftverminderung war wesentlich grösser als die Mehrleistung, die für die Stromerzeugung aufgebracht werden musste. Die Art der Abhängigkeit dieser Zugkraftverminderung von der Stromstärke lässt vermuten, dass noch andere Effekte dabei eine Rolle spielen (Bild 10). So ist z.B. die Oberflächenspannung, die, wie wir vorhin hörten, die Bodenfestigkeit entscheidend beeinflusst, durch Ladungen zu verändern. Wir wissen, dass Ladungen wegen der gegenseitigen Abstossung gleichnamiger Elektrizitätsträger ihren Sitz stets in der Oberfläche von Leitern haben. In der Oberfläche von Flüssigkeitströpfchen suchen sich die Elektrizitätsträger ebenfalls soweit als möglich zu entfernen, d.h. eine elektrische Dehnung setzt die mechanische Oberflächenspannung herab. Das lässt sich zeigen, wenn man an eine Flüssigkeit, die aus einer kleinen Öffnung austropft, eine Spannung anlegt. Die Tropfengrösse wird durch die Oberflächenspannung bestimmt. Steigert man die elektrische Spannung, so wird zunächst die Tropfengrösse kleiner, bis ein glatter Strahl entsteht, der schliesslich zersprüht, wenn die elektrische Dehnung die Oberflächenspannung überwiegt.

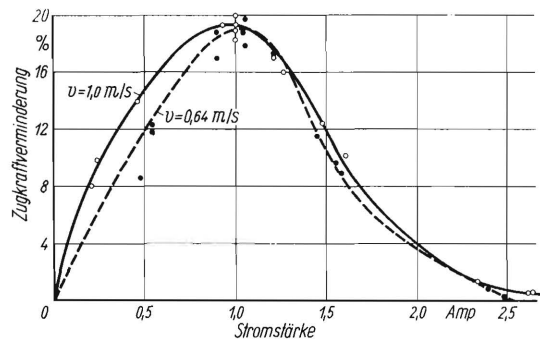


Bild 10. Zugkraftverminderung beim Pflügen durch Anlegen einer Spannung zwischen Schar und Sech (nach Weber [8]). Die Abhängigkeit von der Stromstärke wurde bei zwei verschiedenen Arbeitsgeschwindigkeiten untersucht.

Es ist denkbar, dass durch eine derartige elektrische Beeinflussung der Oberflächenspannung eine Änderung der Bodenfestigkeit erreicht werden kann. Die Weber'schen Experimente bedürfen aber zur restlosen Klärung noch weiterer Untersuchungen.

Zum Schluss seien noch einige nicht physikalische Erscheinungen erwähnt, die ebenfalls von Einfluss auf den Bodenzusammenhalt sind, um zu verdeutlichen, welch ausserordentlich vielfältigen Komplex von Erscheinungen wir mit dem schlichten Wort „Bodenbindigkeit“ umschreiben. Man kann die Oberflächenspannung z.B. auch mit chemischen Zusätzen zur Bodenlösung beeinflussen. Diese Möglichkeit ist von uns ausgenutzt worden, um aus der gemessenen Änderung der Oberflächenspannung einerseits und



der damit erzielten Verminderung der Bodenfestigkeit andererseits den Anteil der Oberflächenspannung an dieser Festigkeit gegenüber anderen Einflüssen, insbesondere gegenüber der Kohäsion abzugrenzen.

Als weitere Faktoren sind zu nennen die Verklebung und Verflechtung durch organische Substanzen, z.B. Humus, aber auch die sog. „Lebendverbauung“ durch Mikroorganismen und Wurzelhärchen.

Schliesslich ist auch noch eine künstliche Verbauung durch synthetische Bodenzusätze möglich, die besonders in den U.S.A. zur Krümelstabilisation und zum Schutz gegen Bodenerosion angewendet wird.

Die verwirrende Fülle von Faktoren, die die Kräfte zwischen den Bodenteilchen beeinflussen, machen es schwer, Gesetze über die Bodenfestigkeit aufzustel-

len. Auch Festigkeitsmessungen sind wegen der Uneinheitlichkeit des Bodens mit Schwierigkeiten verbunden. Dennoch lohnt sich das Studium der Elementarvorgänge. Zum Beweise dafür wurden einige Hinweise auf praktische Anwendungen bodenphysikalischer Erkenntnisse gegeben. Es ist darüber hinaus durchaus möglich, dass Fragen, die zunächst noch der reinen Grundlagenforschung angehören, schon in absehbarer Zeit technische Bedeutung erlangen, z.B. die beschriebenen elektrischen Erscheinungen. Der Schlepper z.B. ist ja seit langem schon nicht mehr nur Traktor, sondern eine Quelle verschiedener Energieformen. Warum soll er nicht eine Steckdose besitzen, die elektrische Energie liefert, um die vorhin erwähnten Wirkungen bei der Bodenbearbeitung zu erzielen?

### Schrifttum

- [1] *Dobeneck, A.v.*: Untersuchungen über das Adsorptionsvermögen und die Hygroskopizität der Bodenkonstituenten. *Forsch. Agrikult.-Phys.* 15 (1892) S. 198.
- [2] *Buckingham, E.*: U.S. Depart. Agr. Bur. of Soils, Bull. 38 (1907).
- [3] *Alten, J.*: Verh. d. I. Komm. d. Int. Bodenkundl. Ges., Bangor 1938.
- [4] *Allberry*: On the capillary forces in an idealized soil. *J. of Agric. Science* 40 (1950) S. 134.
- [5] *Puchner, H.*: Untersuchungen über die Kohäsionskraft der Bodenarten. *Forsch. Agrikult. Phys.* 12 (1889) S. 226.
- [6] *Atterberg, A.*: Die Plastizität und Bindigkeit liefern den Bestandteile der Tone. *Int. Mitt. f. Bodenkunde* 3 (1913) S. 291.
- [7] *Nichols, M.L.*: The dynamic properties of soils. *Agric. Engng.* Vol. 12 (1931) Nr. 7.
- [8] *Weber, F.*: Untersuchungen über den Einfluss des elektrischen Stromes auf den Zugkraftbedarf beim Pflügen. *Diss. T.H. München* 1932. (vergl. auch *Z. VDI* 77 (1933) S. 198 und *Techn. i. d. Landw.* 22 (1941) S. 148/149).

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung  
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode  
Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Kloth

Anschrift des Verfassers: Dipl.-Phys. Albrecht Gerlach, (20b) Braunschweig, Bundesallee 50